

La Ópera de Sídney como cambio de paradigma: de la rigurosidad geométrica clásica al informalismo contemporáneo

Juan Rey Rey

En numerosas ocasiones a lo largo de la historia, en el mundo de la arquitectura, como en muchos otros ámbitos, la imaginación de los creadores ha ido por delante de las posibilidades técnicas y constructivas de cada momento histórico. Así, algunas de las formas gestadas en las cabezas de diversos grupos de arquitectos han tardado años e incluso décadas en pasar del cuaderno a materializarse como realidad construida.

Al igual que ha ocurrido en numerosas ocasiones, por ejemplo, en el campo de la ciencia-ficción, objetos e ideas a priori irreales han acabado por concretarse pasado el tiempo, una vez que el desarrollo tecnológico e industrial ha propiciado su materialización. Así por ejemplo, Julio Verne se adelantó en algunas de sus obras varias décadas a los avances técnicos y científicos de nuestro tiempo¹. También George Méliès en su película «Viaje a la Luna» (1902) predijo con 67 años de adelanto el momento histórico en el que Neil Armstrong ponía un pie en la Luna a bordo del Apolo XI, una nave espacial que curiosamente no dista demasiado de la imaginada por Méliès en su película (figura 1).

Volviendo al mundo de la arquitectura, el desarrollo de ordenadores cada vez más potentes así como de software específico, tanto en el ámbito del análisis estructural como en el de la representación gráfica, ha posibilitado la materialización de muchos proyectos que pocos años antes parecían utópicos y que en muchos casos se habían quedado en un cajón a la espera de que llegase el momento en el que los medios

técnicos alcanzasen una madurez suficiente para garantizar un desarrollo exitoso tanto del proyecto como de la posterior construcción del edificio en cuestión.

Durante las décadas de los cuarenta a sesenta del siglo XX concurren una serie de hechos decisivos. La invención de las curvas de Bèzier (1962, precedente de las *NURBS*) y del Método de los Elementos Finitos (1956) y su posterior popularización mediante programas informáticos de C.A.D. (*Computer-Aided Design*) y de análisis estructural, han posibilitado el desarrollo de propuestas formales que antes resultaban irresolubles en la práctica. Este proceso ha



Figura 1
Fotograma de la película «Viaje a la Luna» del ilusionista y cineasta francés George Méliès (Méliès 1902)

sido posible debido también a la evolución exponencial de la potencia de los ordenadores que sirven de soporte a los mencionados programas informáticos².

Un ejemplo de lo comentado anteriormente concurre en la trayectoria profesional de Peter Eisenman (Newark, New Jersey, 1932), arquitecto norteamericano perteneciente al grupo de los denominados «*Five Architects*». Su perfil teórico e investigador le ha llevado a que hasta fechas recientes no haya visto construidas sus obras más importantes, algunas de ellas concebidas en las décadas de los sesenta y setenta del siglo pasado. Su primer proyecto gestado y dibujado con ayuda de ordenadores fue el Aronoff Center for Design and Art (1988-96) (figura 2). Con anterioridad a dicho proyecto, aunque en su estudio sí se dibujaron otros edificios con ayuda de ordenadores —en la fase de elaboración de planos—, la fase inicial de concepción del proyecto se realizaba siempre a través de croquis y dibujos a mano alzada. Él mismo reflexiona a este respecto en una entrevista: «He empezado a utilizar el ordenador para que me genere figuras que yo no puedo hacer a mano. Mi mano, creo, está limitada por la estética clásica... el ordenador me libera y produce formas que no entiendo, y en las que ni había pensado... Parecen desconocidas, difíciles o alienantes: parece incluso que las hayan reprimido».

Por tanto, estas limitaciones técnicas se han ido paulatinamente acotando hasta llegar a la situación actual en la que se puede afirmar que cualquier plan-

teamiento formal puede ser analizado desde un punto de vista estructural. Se puede concluir por tanto que ha desaparecido la barrera del análisis en lo que al desarrollo de un proyecto de arquitectura se refiere (Rey y Fernández 2011).

Esto ha provocado una verdadera revolución a nivel formal en el mundo de la arquitectura, especialmente en el campo de la edificación singular o icónica. Podría considerarse que si la revolución industrial modificó de forma importante la dirección de la arquitectura del siglo XX esta nueva revolución digital está operando de manera equivalente en estos primeros años del siglo XXI (Steele 2001).

Además, una vez la técnica no es una traba sino que, por el contrario, es una potente herramienta que se domina con cierta maestría, aparecen los primeros síntomas de manierismo, materializado en la concepción de edificios como verdaderos ejercicios de estilo (Martínez 2010).

LA REVOLUCIÓN DIGITAL

Si se analiza de forma relacionada la evolución histórica de la teoría de análisis de estructuras, los métodos de representación gráfica y los avances tecnológicos en los materiales y medios constructivos con la producción arquitectónica en cada periodo histórico, se puede apreciar por ejemplo cómo en el caso de la revolución industrial la transformación en el ámbito de las formas arquitectónicas fue debida a la aparición de nuevos materiales estructurales (fundamentalmente acero y hormigón). En cambio, el gran giro que se ha producido a nivel formal en los edificios icónicos en las últimas décadas responde al desarrollo de nuevos métodos de cálculo y representación gráfica así como a la generalización de los ordenadores personales para el desarrollo de los proyectos arquitectónicos; lo que podríamos denominar como la revolución digital (Bernabéu 2007).

Se puede establecer además de forma simbólica una franja temporal abarcando aproximadamente una década (entre 1980 y 1989), como el periodo temporal de transición hacia la eliminación de la barrera del análisis estructural y de la representación gráfica en el desarrollo de los proyectos arquitectónicos (Rey 2013).

La Ópera de Sídney y el Museo Guggenheim de Bilbao pueden considerarse como los dos edificios



Figura 2

Aronoff Center for Design and Art (1988-96), obra de Peter Eisenman. Primer edificio en la trayectoria del arquitecto americano en el que para su concepción se emplearon ordenadores (Levene y Márquez 1997)

más paradigmáticos en este proceso. En el primer caso por tratarse de uno de los primeros intentos fallidos de materializar una propuesta basada en lo que se conoce como «formas libres» (Azagra y Bernabeu 2012) y que hoy en día ha acabado por generalizarse en muchos casos en los concursos de arquitectura de edificios singulares. El segundo caso, por el contrario, representa un ejemplo pionero de construcción de un edificio con una geometría no definida matemáticamente gracias a un uso intensivo de las nuevas herramientas anteriormente indicadas.

LA ÓPERA DE SÍDNEY

La Ópera de Sídney (figura 3) condensa en un único edificio gran parte de los aspectos expuestos con anterioridad en relación a la influencia que los métodos de representación y análisis estructural ejercen en la

concepción y construcción de las obras de arquitectura (Rey 2013).

La idea general del edificio, que data de 1956, se enmarca en una época inmediatamente anterior a la del desarrollo científico y tecnológico anteriormente referido. En este caso, cuando se comenzó a trabajar en el diseño del edificio no existían ordenadores personales ni por tanto los programas informáticos asociados en el ámbito de la representación gráfica y el análisis estructural. Por otra parte, el Método de los Elementos Finitos estaba siendo presentado en esa época y no se encontraba lo suficientemente desarrollado para emplearse en el análisis de la estructura de las cubiertas.

Utzon decide partir de un formalismo como idea generadora del edificio, en la que no tiene en cuenta el esquema resistente, en lo que se puede considerar como un avance de lo que ha acabado por generalizarse en el planteamiento de muchos de los edificios singulares en el principio de este nuevo siglo (figura 4). Así, en pala-



Figura 3
Vista aérea de la Ópera de Sídney (Drew 1995)



Figura 4
Portada del Sydney Morning Herald con imágenes de la propuesta vencedora y finalistas (Watson 2006)

bras del propio Utzon: «...en lugar de crear formas ortogonales, he creado una escultura —una escultura que cubre todos los usos necesarios» (Drew 1999).

Las superficies inicialmente dibujadas a mano alzada por Utzon y que representaban las cubiertas carecían de una forma definible matemáticamente. Pronto se pudo comprobar que estas superficies no eran analizables ni construibles con los medios técnicos ni constructivos de la época. A lo largo de más de cuatro años, los ingenieros de Arup, a cargo del diseño estructural del edificio, estudiaron hasta ocho posibles formas diferentes para las cubiertas (figura 5), desde los primeros diseños basados en parábolas, pasando por elipsoides hasta las definitivas consistentes en superficies de una misma esfera (Arup 1974).

Es importante destacar que la Ópera de Sídney es el primer proyecto de edificación en el que para su desarrollo se emplearon de forma significativa ordenadores. En concreto Arup³, además de hacer uso de

las computadoras existentes en la Universidad de Southampton, adquirió una computadora *Ferranti Pegasus-1* (figura 6), que había comenzado a comercializarse en 1960 (Watson 2006).



Figura 6

Imagen del ordenador Ferranti Pegasus-1, empleado por Arup en el proyecto de la Ópera de Sídney. Como se observa en la imagen, tenía el tamaño de un armario (Watson 2006)

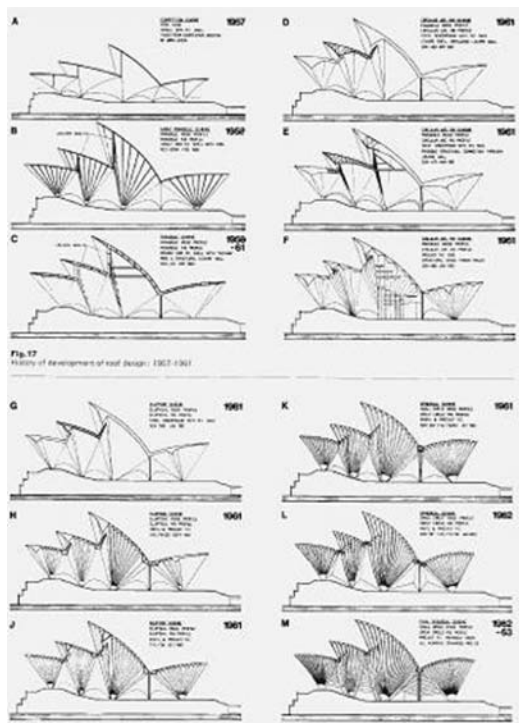


Figura 5

Evolución temporal de las soluciones estudiadas para las cubiertas (Arup 1974)

Un problema importante con el que se encontró el equipo de Arup era la inexistencia de software específico de cálculo de estructuras. Alan Baker, un recién licenciado de Arup, desarrolló un programa de análisis de estructuras de barras en lenguaje máquina (código fuente de *Pegasus*) como parte de su tesis doctoral, basado en el Método Matricial de la Rigidez⁴. Inicialmente el programa estaba limitado al análisis de estructuras de barras de hasta 18 nudos, pero vislumbrando el potencial de esta herramienta, Arup decidió tratar de emplearlo para el análisis las cubiertas de la ópera, extendiéndolo a un número mayor, si bien todavía modesto, de nudos. Así, simulaban las cubiertas laminares con barras. El modelo de la cubierta de mayor tamaño tenía 136 nudos, lo que derivaba en aproximadamente 780 ecuaciones. Para procesar 5 casos de carga en estas condiciones se tardaba aproximadamente 4 horas. La preparación de los datos y su cálculo completo se prolongaba aproximadamente durante 3 semanas (Watson 2006).

A pesar de este intento pionero de integrar el potencial de los nuevos medios digitales, el proyecto del edificio, y en particular de las cubiertas, debió realizarse finalmente con medios básicamente manuales y apoyándose en la realización de modelos a es-

cala (figuras 7 y 8), tanto en lo referente a su representación gráfica como al análisis estructural. Esta ausencia de herramientas de diseño disponibles acordes a la complejidad formal de la propuesta planteada condicionó enormemente la marcha del proyecto, dilatándose dramáticamente en el tiempo y multiplicándose su coste final de forma desproporcionada.



Figuras 7 y 8

Modelo a escala para el análisis estructural de las cubiertas de la Ópera de Sídney (Watson 2006)

No obstante, el empleo de las nuevas herramientas digitales no fue baladif. Durante un discurso en la *Institution of Structural Engineers* de Londres en el año 1969, Ove Arup pronunció las siguientes palabras:

«With hindsight, it is felt the shells could probably not have been built without the use of computers. We could not have produced the mass of information, let alone the analytical work, necessary to erect the building in the time available», y es que a pesar del retraso de aproximadamente 11 años con el que se finalizó la construcción del edificio, de no ser por el empleo pionero de ordenadores para el desarrollo de los cálculos estructurales, los plazos se hubiesen dilatado de forma todavía más dramática.

En cualquier caso, tras casi dos décadas de esfuerzos aunados de algunos de los más brillantes arquitectos e ingenieros de la época, Utzon no pudo ver finalmente construida la ópera que había soñado. Donde éste había imaginado una fina lámina de hormigón flotando sobre el paisaje se construyó una estructura más pesada, formada por costillas pretensadas de hormigón con unas secciones notablemente mayores. Donde había propuesto una serie de *formas libres*, con una marcada componente de horizontalidad, hoy existe una estructura con una geometría netamente definida, formada por superficies tomadas todas ellas de una misma esfera, potenciando de esta forma involuntariamente la verticalidad del edificio.

Por tanto, debido en buena medida a que estas nuevas herramientas digitales no estaban lo suficientemente desarrolladas, la propuesta de concurso debió ser modificada de forma sustancial —tanto geométrica como tipológicamente— para permitir su representación gráfica, análisis estructural y, en último término, su construcción.

Y pese a todo lo referido anteriormente, el edificio puede considerarse un rotundo éxito, convirtiéndose inmediatamente en el símbolo no ya de una ciudad sino de todo un país y un continente. Un hito de la arquitectura a nivel global, considerado de forma casi unánime como uno de los edificios más importantes construidos a lo largo del pasado siglo⁵. Un punto de inflexión que anticipaba la corriente de construcción de hitos arquitectónicos con afán diferenciador y de reclamo turístico que iba a producirse a lo largo de las siguientes décadas en muchas ciudades del mundo.

EL MUSEO GUGGENHEIM DE BILBAO

El museo Guggenheim de Bilbao (figura 9), inaugurado el 18 de octubre de 1997, constituye uno de los

primeros edificios en los que para su desarrollo se emplearon de forma relevante ordenadores personales y programas informáticos comerciales, tanto de representación gráfica tridimensional (Catia), como de análisis estructural mediante el Método de los Elementos Finitos (AES) y de fabricación CAD-CAM (Bocad) (Van Bruggen 1998).



Figura 9
Museo Guggenheim de Bilbao (1987-1997), obra de Frank Gehry (Van Bruggen 1998)

El proyecto del edificio, obra del arquitecto canadiense Frank O. Gehry (Toronto, 1929), fue iniciado en 1987. El diseño del museo es geoméricamente complejo, consistiendo en una serie de volúmenes interconectados, cada uno de ellos con formas aparentemente *libres*. La creación por parte de Gehry de una volumetría marcadamente orgánica fue posible gracias al empleo por primera vez en el ámbito de los proyectos arquitectónicos del programa Catia. Este *software* permitió al arquitecto canadiense manipular modelos tridimensionales de sólidos posibilitando la creación de superficies curvas a antojo. El empleo de Catia supuso en este caso la ruptura de la barrera formal que impedía que ideas que llevaban años gestándose en su cabeza pudiesen llevarse a cabo.

Así, éste exportaba directamente las enrevesadas formas de sus maquetas a Catia, mediante el empleo de escáneres 3D que reconocían los puntos de las superficies de las maquetas transformándolos en coordenadas tridimensionales en el sistema digital (figura 10). Por su parte, el uso de sistemas de celosías de acero permitió a SOM, la ingeniería al cargo del diseño estructural, el planteamiento de un esquema re-

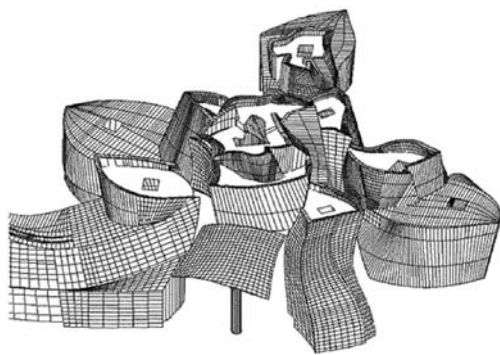


Figura 10
Modelo digital desarrollado por el equipo de Gehry (Van Bruggen 1998)

lativamente sencillo para la generación de estas formas tan complejas.

El *exitoso* desarrollo del proyecto y construcción del edificio (Caicoya 1997) con esta forma enormemente compleja y alejada de lo habitual hasta la fecha, puso encima de la mesa la existencia o no de límites geoméricos a las formas construidas. En este caso, a diferencia del anterior, el reto que suponía construir un edificio con la compleja forma propuesta inicialmente fue superado y con este *éxito* se abrió además la caja de Pandora que representaba la libertad formal en el campo de los proyectos arquitectónicos. Numerosos edificios en años posteriores, principalmente en la primera década del siglo XXI, han seguido esta tendencia, creando lo que se puede considerar una nueva corriente estilística, basada en las «formas libres» (Azagra y Bernabeu 2012).

DE LA RIGUROSIDAD GEOMÉTRICA CLÁSICA AL INFORMALISMO CONTEMPORÁNEO

Con la Ópera de Sídney se inauguró por tanto una senda por la que anteriormente rara vez habían discurredo los proyectos arquitectónicos: el proyectista deja de lado las consideraciones mecánicas o funcionales a la hora de proyectar, centrándose fundamentalmente en los aspectos formales y confiando en que una solución técnica viable podrá ser encontrada a posteriori por terceros.

En este caso esta esperanza se reveló fallida pero, con el paso del tiempo, se aprecia cómo el *modus operandi* de Utzon ha servido de germen e inspiración a la corriente surgida en fechas recientes en relación a los «edificios de autor» para *poner una ciudad en el mapa*. A pesar de que quizás el museo Guggenheim de Bilbao sea el ejemplo más paradigmático de este tipo de operaciones de regeneración urbana en torno a la construcción de un icono, el propio Gehry reconoce que el encargo fue llevado a cabo a imagen y semejanza de lo ocurrido en el caso de la Ópera de Sídney: «When I was called for Bilbao, they asked me for an equivalent to the Sydney Opera House—that was part of the brief—they picked me as the winner because they thought they had a chance of getting the Sydney Opera House out of it...After it was built people started going to Bilbao and that changed the economics of the city. It was wildly successful».

En los croquis iniciales de Gehry para el Museo Guggenheim de Bilbao encontramos un conjunto de superficies alabeadas en principio mucho más complejas que las propuestas por Utzon para su Ópera en Sídney años atrás. Pero en ese momento la elaboración de modelos precisos ya no era un problema. Gehry plantea su propuesta partiendo por tanto de una serie de croquis en los que expresa un conjunto de líneas aparentemente enmarañadas a través de las que imagina los volúmenes que configurarán el nuevo museo (figura 11). Por supuesto estas formas se plantean sin tener en cuenta en absoluto las formas estructurales canónicas para la resolución de los problemas conocidos, puesto que el arquitecto considera que la representación y cálculo del edificio son aspectos resolubles sea como sea el planteamiento de partida. Establece como fuente de la belleza del edificio sus sinuosas superficies y supedita la estructura a dicho formalismo, propio por otra parte de la corriente deconstructivista del que el arquitecto canadiense es uno de sus máximos exponentes.

os pocos años de diferencia que separaron ambos edificios marcaron una diferencia decisiva. Si Utzon y su equipo tenían que confiar en sus croquis y planos delineados a mano para el encaje y definición de la estructura del edificio, Gehry pudo hacer uso de *software* de visualización tridimensional (*Catia*, empleado hasta el momento únicamente en el ámbito de la ingeniería aeroespacial) para crear de manera casi instantánea vistas del edificio a su antojo. Además,



Figura 11
Croquis iniciales de Frank Gehry recogiendo su propuesta para el nuevo museo Guggenheim de Bilbao (Van Bruggen 1998)

empleaba también de forma pionera herramientas de escaneado 3D para crear maquetas físicas a partir de su modelo tridimensional virtual, que a su vez manipulaba y volvía a importar en el ordenador, generando un proceso iterativo de *depuración* de la forma del edificio. Pero lo más importante es que el modelo tridimensional virtual generado por el equipo de Gehry proporcionaba los datos necesarios para realizar un análisis estructural empleando paquetes de *software* FEM así como para generar la documentación de proyecto con gran precisión y rapidez, lo que repercutía además en un mayor control de costes. Así, el museo Guggenheim de Bilbao pudo ser finalizado según los costes y plazos previstos en buena medida gracias al uso intensivo de los nuevos medios tecnológicos disponibles. Por el contrario, la construcción de la Ópera de Sídney, que no pudo contar con estos importantes avances tecnológicos, se demoró durante 17 años, finalizando con un coste desorbitadamente superior al previsto inicialmente (aproximadamente un 1.230%).

El museo Guggenheim de Bilbao es paradigmático de esta manera de concebir el proyecto arquitectónico: se entiende el edificio como una pura creación plástica, resultado de un proceso creativo más próximo al ámbito de la escultura en el contexto contemporáneo, centrándose en la pura experimentación formal. Posteriormente, será por tanto necesario buscar un procedimiento adecuado para hacer viable su construcción. En el caso de la estructura Guggenheim mediante una *simple* solución metálica triangulada que se va adaptando a la forma predefinida (figura 12). En el caso de la fachada mediante un material relativamente deformable que permite de este modo adaptarse a la *visión* inicial del *objeto*. En



Figura 12
Estructura metálica principal del museo Guggenheim de Bilbao (Van Bruggen 1998)

cualquier caso, se debe subrayar que gran parte de las soluciones estructurales aplicadas en este tipo de edificios siguiendo este planteamiento opuesto al modo clásico de proyectar, son por este motivo tremendamente forzadas y generalmente se encuentran lejos del óptimo.

En definitiva, esta liberación de las históricas ataduras formales ha generado un escenario posibilista, en el cual, por el hecho de que cualquier geometría puede ser analizable y construible, no significa que necesariamente deba optarse siempre por esta vía de la complejidad y liberación formal. De hecho, existe un gran número de arquitectos e ingenieros que se oponen con vehemencia a esta nueva tendencia. Así, se ha generado un interesante debate a este respecto que ha salpicado a todos los ámbitos de la profesión.

En esta línea, por ejemplo J.A. Fernández Ordóñez afirmaba en una conferencia pronunciada en 1990 que «...en la búsqueda de formas estructurales

la razón y el amor a la belleza deberían tener objetivos comunes,...la dificultad radica en coordinar y equilibrar la imaginación que produce la forma con la razón que la determina y la fija. Hoy que las ataduras son menores, ahora que todo es calculable y construible, la búsqueda de lo verdadero es más difícil porque el camino hacia la solución formal es más oscuro, precisamente por ser más sencillo. Es como el agua que, al faltarle el cauce hendido, se extiende sin rumbo por el llano y todo lo inunda sin destino».

Efectivamente, podría considerarse que la desaparición de las limitaciones técnicas en el desarrollo de los proyectos arquitectónicos ha propiciado la generación de un contexto en el que por primera vez el arquitecto se enfrenta al escenario del «lienzo en blanco». Ya no es imprescindible partir de un catálogo de formas conocidas sino que, al igual que ocurre en otras disciplinas artísticas como la pintura o la literatura, es posible concebir el proceso creativo del edificio de la nada más absoluta.

En este nuevo contexto, el ámbito de la ingeniería estructural está en algunos casos abandonando peligrosamente la manera tradicional de enfocar el diseño estructural; históricamente ligado a lo estricto, la forma mínima, el empleo racional de los materiales, en definitiva: a la economía.

CONCLUSIONES

El importante desarrollo tecnológico e industrial surgido especialmente durante la segunda mitad del siglo pasado ha configurado un caldo de cultivo propicio para la transformación de las formas arquitectónicas de una manera radical y rupturista, viéndose apoyado este proceso en los avances no solo tecnológicos sino también científicos.

Las históricas limitaciones técnicas en el ámbito de los proyectos arquitectónicos se han acotado paulatinamente desembocando en la situación actual en la que cualquier planteamiento formal puede analizarse desde un punto de vista estructural.

Previamente a la eliminación de dicha barrera una gran parte de los edificios que se construían se planteaban en función de que fuesen fácilmente calculables o al menos que fuese posible su análisis con los métodos científicos y herramientas tecnológicas disponibles. Muchos planteamientos formales eran de

este modo descartados por resultar su análisis estructural demasiado complejo.

Esto ha provocado una verdadera revolución a nivel formal en el mundo de la arquitectura, especialmente en el campo de la edificación singular o icónica, estableciéndose de forma simbólica el diseño y construcción de la Ópera de Sídney y del museo Guggenheim de Bilbao como verdaderos paradigmas y puntos de inflexión.

La Ópera de Sídney condensa en un único edificio gran parte de los aspectos expuestos con anterioridad en relación a la influencia que los métodos de representación gráfica y análisis estructural ejercen en la concepción y construcción de las obras de arquitectura. El edificio fue gestado en una época (1956-1973) inmediatamente anterior a la del desarrollo científico y tecnológico anteriormente referido y, a pesar de emplearse de forma pionera ordenadores durante su desarrollo, tanto el *software* como el *hardware* no estaban lo suficientemente maduros. Utzon no tuvo acceso a la tecnología enfocada al diseño y al poder computacional con el que sí que contó Gehry tan solo unas décadas después. Debido a esto, Utzon y sus ingenieros encontraron grandes dificultades en encontrar una forma viable de construir las cubiertas de hormigón de la Ópera de Sídney tal y como habían sido concebidas.

Así, el proyecto del edificio debió realizarse con medios básicamente manuales y adoptando importantes simplificaciones, tanto en lo referente a la representación gráfica como al análisis estructural. Esta ausencia de herramientas de diseño disponibles acordes a la complejidad formal de la propuesta planteada condicionó enormemente la marcha del proyecto, dilatándose dramáticamente en el tiempo y multiplicándose su costo final de forma desproporcionada. Además, la solución estructural construida dista mucho de la imaginada por Utzon inicialmente, debido a las importantes modificaciones que debieron introducirse para hacer viable su análisis y representación.

Pocos años después, Gehry reiteró en la idea de Utzon de partir de un formalismo, confiando en que los avances tecnológicos podrían hacer posible la construcción de su propuesta para el nuevo museo Guggenheim en Bilbao. En este caso, ya con las nuevas herramientas tecnológicas suficientemente desarrolladas, dicho procedimiento se reveló viable.

En cualquier caso, esta compleja coyuntura en la

que nos encontramos no debe hacernos perder de vista que, en realidad, no se trata más que de nuevas herramientas al servicio de la creatividad de los arquitectos e ingenieros y que son éstos en último término los responsables de hacer un uso sensato y responsable de las mismas. En palabras del arquitecto australiano Glenn Murcutt: «La mayoría de los arquitectos que construyen edificios extraños asegura que lo hacen porque ahora la tecnología lo hace posible. Eso me parece absurdo. Poder hacer una cosa no legítima hacerla».

NOTAS

1. Por ejemplo en su obra «De la Tierra a la Luna» (1865).
2. En 1965 el cofundador de Intel, Gordon E. Moore, enuncia la conocida como «Ley de Moore», que establece que aproximadamente cada 18 meses se duplica el número de transistores de un circuito integrado. El cumplimiento de dicha ley se ha podido constatar de forma empírica hasta el día de hoy.
3. A pesar de que Ove Arup fue uno de los pioneros en el empleo de ordenadores para el desarrollo de análisis estructurales en el ámbito de las estructuras de edificación, es célebre su frase: «If you don't know the order of magnitude of the answer, don't use the computer».
4. Que acababa de presentarse pocos años antes.
5. Según el arquitecto y crítico Richard Weston es uno de los cuatro únicos edificios construidos que pueden ser considerados como «Monumento mundial» junto con la Torre Eiffel, la pirámide de Gizeh y el Taj Mahal.

LISTA DE REFERENCIAS

- Arup, Ove; et al. 1973. *The Arup Journal*. London: Ove Arup Partnership.
- Azagra, D. y A. Bernabeu. 2012. «La estructura de las formas libres». *Informes de la construcción*. Abril-junio 2012. Vol. 64, 526, 133-142. Madrid: CSIC.
- Bernabeu, Alejandro. 2007. «El diverso Origen de nuevas formas estructurales y arquitectónicas: la aparición de nuevos materiales en los siglos XIX y XX frente al desarrollo tecnológico actual». *Quinto congreso nacional de Historia de la Construcción, Burgos*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Caicoya, César. 1997. «Algunos aspectos del proceso de construcción del museo Guggenheim de Bilbao». *Informes de la construcción*. Abril-junio 1997. Vol. 49, 426, 133-142. Madrid: CSIC.

- mes de la Construcción*. Septiembre-octubre 1997. Vol. 49, nº 451. Madrid: CSIC.
- Drew, Philip. 1995. *Sydney Opera House*. Londres: Phaidon
- Drew, Philip. 1999. *The masterpiece. Jørn Utzon: a secret life*. Sídney: Hardie Grant Books.
- Levene, Richard C. y Fernando Márquez (ed.). 1997. «Peter Eisenman 1990-1997». *Revista El Croquis*. Madrid: El Croquis Editorial.
- Martínez Calzón, Julio. 2010. «Treatment of the form in structural engineering». *Structures and Architecture*. Paulo J. S. Cruz (ed.). Londres: Taylor & Francis Group.
- Rey Rey, J. 2013. *La barrera del análisis estructural en el desarrollo de los proyectos arquitectónicos. El caso de la Ópera de Sídney*. Tesis doctoral dirigida por Ricardo Aroca Hernández-Ros. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, UPM.
- Rey Rey, J. y J.L. Fernández Cabo. 2011. «La desaparición de la barrera del análisis estructural en los proyectos arquitectónicos». *Congreso Hitos Estructurales de la Arquitectura e Ingeniería*. Madrid.
- Steele, James. 2001. *Arquitectura y revolución digital*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Van Bruggen, Coosje. 1998. *Frank O. Gehry. El museo Guggenheim de Bilbao*. Nueva York: The Solomon R. Guggenheim Foundation.
- Watson, Anne (ed.). 2006. *Building a Masterpiece: the Sydney Opera House*. Sídney: Powerhouse Publishing.